Snubber netwerken

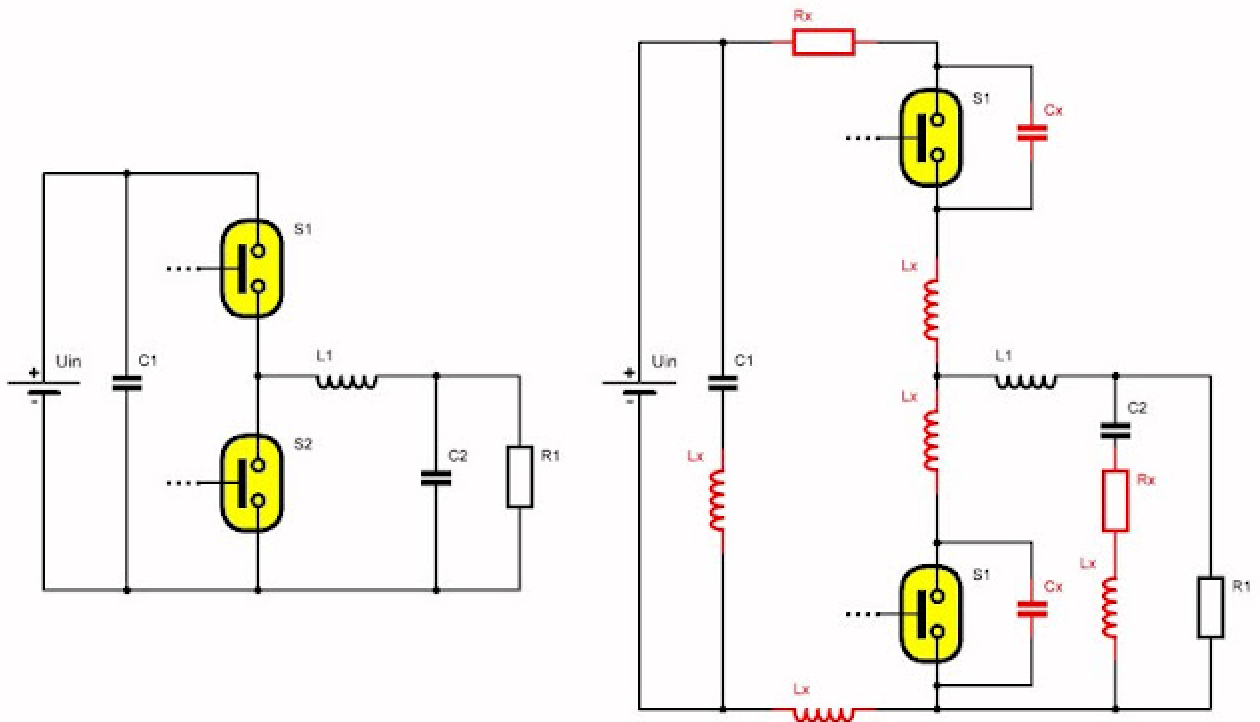
U moet een snubber toepassen als u te maken krijgt met snelle en/of grote transiënt-spanningen. Die ontstaan als u inductieve belastingen in- en uitschakelt. Dergelijke belastingen zitten op de meest onverwachte plekken in uw schakeling!

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 14-05-2024

Achtergrond-informatie: schakelen van spanningen

Digitale elektronica betekent...schakelen
De voornaamste eigenschap van een digitale schakeling is dat de spanningsniveaus maar twee waarden kunnen aannemen. Meestal zijn dat 0 V en een bepaalde positieve spanning, bijvoorbeeld +5 V. Het omschakelen tussen die twee spanningen gebeurt heel snel. Als de belasting die op zo'n schakelende spanning is aangesloten zuiver resistief is, gebeurt er vrij weinig extra. De spanning over de resistieve belasting schakelt ook netjes om tussen de twee waarden. '*Zuiver resistief*' betekent dat er uitsluitend weerstanden worden geschakeld, bijvoorbeeld ouderwetse gloeilampen of verwarmingselementen.

Inducties en capaciteiten in een schakeling
Anders wordt het als de belasting niet resistief is, maar inductief. Bij het woord '*inductief*' moet u denken aan alle onderdelen die een spoel bevatten. Dat zijn niet alleen transformatoren en zelfinducties, zoals in geschakelde voedingen voorkomen, maar ook relais en motoren. Ieder relais heeft immers per definitie een spoel en ook dat is een zware inductieve belasting voor een digitale schakeling. Bij motoren moet u niet alleen denken aan zware exemplaren zoals die in boormachines en dergelijke apparaten zitten. Ook in een simpele ventilator waarmee u de eindtransistoren in uw lineaire voeding koelt zit een motor die een inductieve belasting vormt.
Behalve die duidelijk zichtbare spoelen zitten er ook een heleboel onzichtbare inducties in iedere schakeling. In serie met iedere weerstand staat bijvoorbeeld een kleine inductie, een gevolg van de manier waarop die weerstand is vervaardigd. Zo'n niet zichtbare inductie noemt men '*parasitair*'. Ook een halfgeleider schakelaar, zoals een MOSFET, heeft een kleine inductie die in serie staat met de eigenlijke schakelaar.
Bovendien zijn er in iedere schakeling ook parasitaire capaciteiten aanwezig. Ook dat is een gevolg van de manier waarop onderdelen worden gefabriceerd. Die staan meestal niet in serie, maar parallel over het betreffende onderdeel.
In het onderstaand schema is als voorbeeld getekend hoe een eenvoudige schakeltrap, links getekend, door de elektronen die er doorheen vloeien wordt ervaren, rechts getekend. In het rood zijn alle parasitaire inducties, weerstanden en capaciteiten ingetekend.



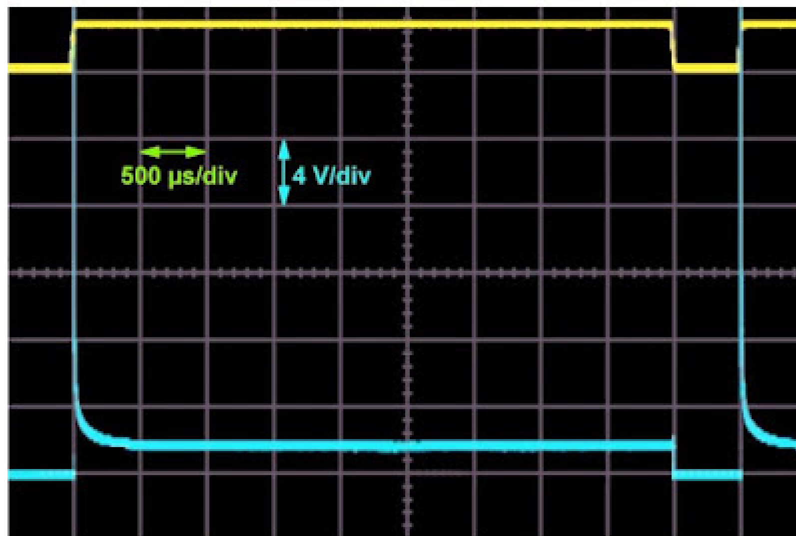
Parasitaire weerstanden, inducties en capaciteiten in een schakeltrap.
(© 2024 Jos Verstraten)

Inducties en capaciteiten veroorzaken stoorsignalen
Als u aan zo'n combinatie van échte en parasitaire inducties en parasitaire capaciteiten een digitaal signaal aanlegt kunnen er rare dingen gebeuren. Op het moment dat het signaal van 'L' naar 'H' schakelt of van 'H' naar 'L' zal de stroom in het circuit opeens opkomen of wegvallen. Deze plotselinge grote stroomvariaties veroorzaken twee soorten stoorsignalen in de schakeling:

- Tegen-emk
- Ringing

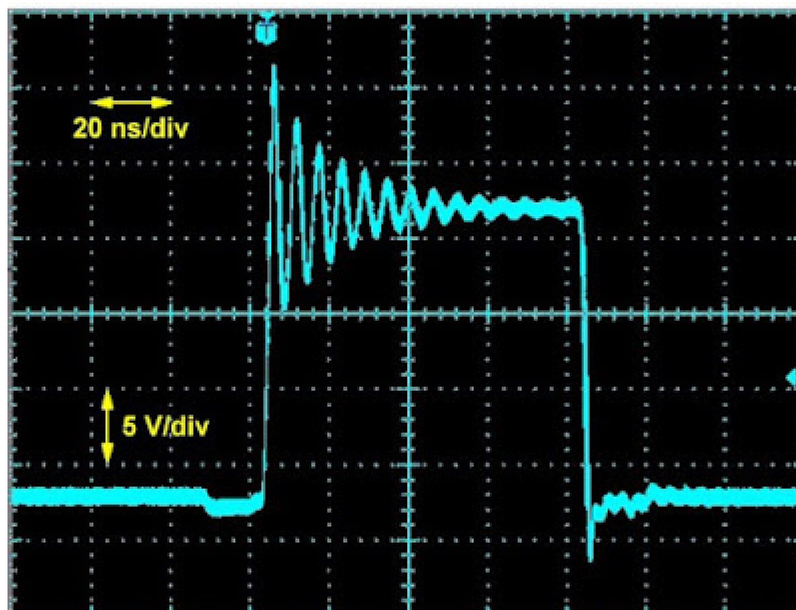
Deze signalen worden '*transiënt-spanningen*' genoemd. Transiënt betekent '*van voorbijgaande aard*' en dat is een goede omschrijving van deze signalen. Zij zijn maar heel even aanwezig, maar kunnen in dat '*even*' vervelende effecten veroorzaken.

De tegen-emk
Als u een relaisspoel bekrachtigt door er een stroom doorheen te sturen, zal deze stroom rond de spoel en in het ijzeren anker een magnetisch veld opbouwen. Stel nu dat u de stroom opeens tot nul reduceert. Op dat moment is het magnetisch veld nog aanwezig. Maar omdat de oorzaak van dit veld, de stroom, is weggevallen, zal ook het veld verdwijnen. Op dat moment bevindt de spoel van het relais zich dus in een variërend magnetisch veld. Het gevolg is dat er in de spoel een inductiespanning wordt opgewekt. Deze inductiespanning kan vele malen groter zijn dan de voedingsspanning van de elektronische schakeling. Het gevaar bestaat dat sommige onderdelen niet tegen deze inductiespanning bestand zijn en doorslaan.
Deze inductiespanning noemt men de '*tegen elektromotorische kracht*' van het relais, een mondvol dat meestal wordt afgekort tot '*tegen-emk*' of zelfs '*temk*'. Het is absoluut noodzakelijk maatregelen te treffen die de nare gevolgen van deze tegen-emk moeten verhinderen.
Deze spanning kan immer zelfs zo groot worden dat de maximale toelaatbare spanning over bijvoorbeeld een triac of een MOSFET wordt overschreden. Het onderdeel kan dan doorslaan.
In het onderstaand oscillogram ziet u een mooi voorbeeldje van de tegen-emk die ontstaat over de spoel van een relais. De gele trace geeft het TTL-signaal (0 V en 4 V) dat het relais in- en uitschakelt. De blauwe trace geeft het signaal over de spoel van het relais.



De tegen-emk veroorzaakt door een uitschakelend relais.
(© CircuitsOnline, edit 2024 Jos Verstraten)

De ringing
Als de spanning over een LC-kring opeens wegvalt zitten er in die snelle overgang heel veel hoogfrequente harmonischen. Iedere LC-kring heeft echter een bepaalde unieke resonantiefrequentie, waarop de kring aanslaat. Bij die frequentie wordt energie uitgewisseld tussen de spoel en de condensator, waardoor er een sinusvormige spanning ontstaat. De kring zal aanslaan op de harmonischen die het dichtst bij de eigen resonantiefrequentie liggen. Over de LC-kring kan een gedempte trilling ontstaan, waarvan de begin amplitude veel groter kan zijn dan de voedingsspanning van de schakeling. Uiteraard sterft dat signaal uit omdat de spanningssprong waarop de kring aanslaat na de 'L' naar 'H' of 'H' naar 'L' overgang niet meer aanwezig is.
Het verschijnsel van het ontstaan van zo'n gedempte trilling op een signaal noemt men '*ringing*'. In het onderstaand oscillogram ziet u een typisch voorbeeld van ringing. In de meeste gevallen ligt de frequentie van de gedempte trilling tussen 150 MHz en 250 MHz.

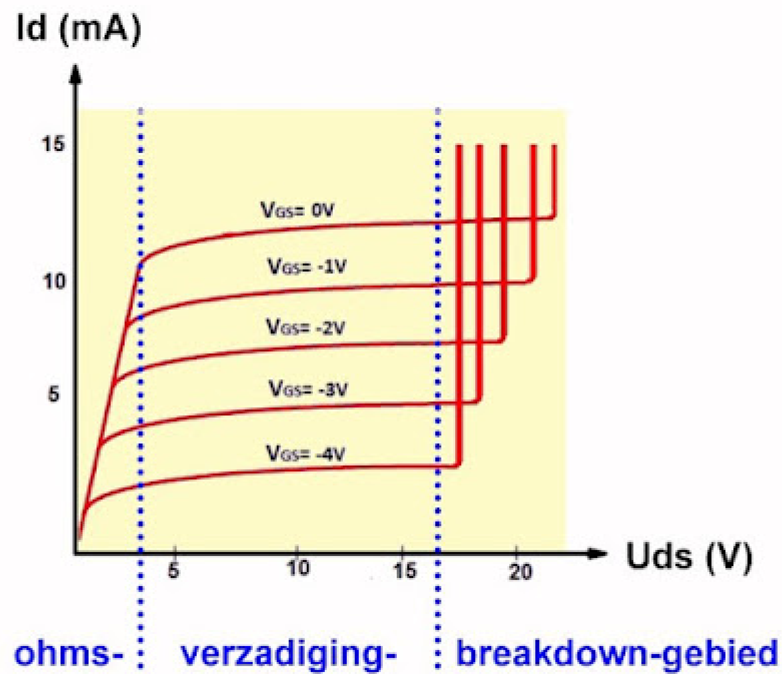


Ringing op een spanningspuls. (© 2023 Chien-Ching Chiu)

De negatieve effecten van ringing en tegen-emk

Overschrijden van de doorslagspanning

Iedere halfgeleider heeft een maximale doorslagspanning (*breakdown voltage*). Als de spanning over dit onderdeel groter wordt dan deze spanning zal de halfgeleider doorslaan. Dat betekent dat de stroom door de halfgeleider opeens sterk gaat stijgen. Tenzij u maatregelen treft om de stroom te beperken leidt dit vrijwel steeds tot de vernieling van de halfgeleider. In de onderstaande figuur ziet u bijvoorbeeld de breakdown spanning van een FET, getekend in de $I_d = f(U_{ds})$ karakteristiek van het onderdeel.
Die uitdrukking $I_d = f(U_{ds})$ is een compacte wiskundige notering van in mensentaal '*de drainstroom I_d wordt grafisch voorgesteld als een functie van de drain/source-spanning U_{ds}*'.
Als de spanning tussen drain en source groter wordt dan de breakdown waarde U_{bds} gaat de grafiek opeens vrijwel verticaal verlopen. Dat betekent dat een kleine spanningsvariatie ΔU_{ds} een zeer grote stroomvariatie ΔI_d tot gevolg heeft.
Bij het ontwerpen van schakelingen moet u er voor zorgen dat een dergelijke situatie zich nooit kan voordoen.

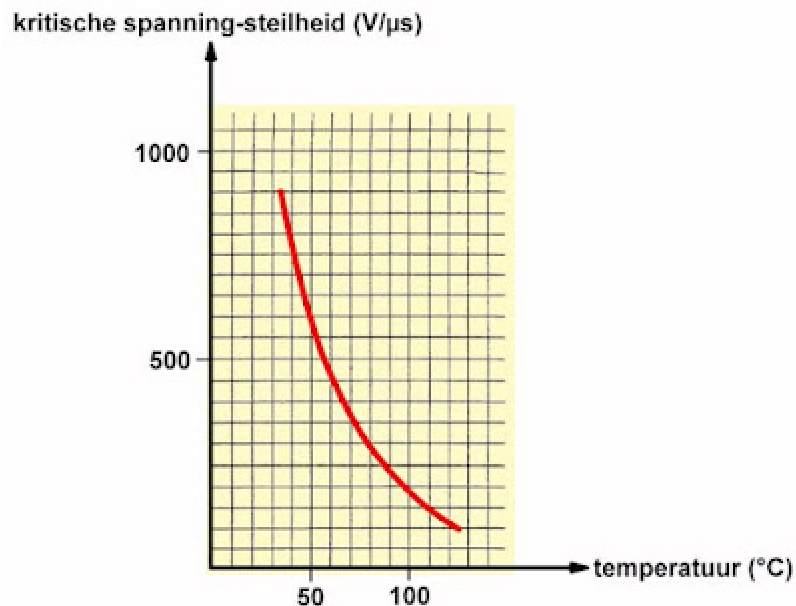


De doorslagspanning van een FET. (© 2024 Jos Verstraten)

Veroorzaken van elektro-smog
De hoogfrequente signalen die in ringing zitten kunnen gemakkelijk via allerlei capacitieve sluipwegen terecht komen op plaatsen waar zij absoluut niet welkom zijn. Ook in de smalle tegen-emk puls zitten uiteraard heel wat hogere harmonischen. Deze signalen moet u zoveel mogelijk onderdrukken en wat ervan over is in de schakeling zélf opsluiten. Vandaar dat in schakelingen waar hoge stromen snel worden in- en uitgeschakeld, bijvoorbeeld in geschakelde voedingen, het absoluut noodzakelijk is tussen de netspanning en de schakeling een zeer goed EMI-filter op te nemen.

Overschrijden van de kritische spanning-steilheid van thyristoren en triac's
Een van de belangrijkste eigenschappen van een thyristor of een triac is dat de steilheid van de spanning die over het onderdeel staat aan een maximale waarde is gebonden. Stel dat over de thyristor een spanning van 0 V staat en dat u opeens een spanning van 100 V aanlegt. Niets gaat traagheidsloos in de natuur, dus ook het aanleggen van deze spanning niet. De spanning over de thyristor zal niet in een oneindig korte tijd van 0 V naar 100 V stijgen, maar zal daar een bepaalde tijd over doen. Dit noemt men de '*steilheid van de spanning*'. Bij thyristoren en triac's is het zo dat deze steilheid aan een maximale waarde is gekoppeld. Dit wordt uitgedrukt door de grootheid '*kritische spanning-steilheid $\Delta u/\Delta t$*' en wordt in de praktijk uitgedrukt door een aantal V/μs. In de praktijk kunt u waarden tegenkomen tussen 100 V/μs en 1.000 V/μs. Bij deze laatste waarde gaat het in de meeste gevallen over geselecteerde onderdelen uit een fabricage-serie, die van een afzonderlijke codering worden voorzien en duurder zijn.

Wat gebeurt er als de spanning over de thyristor of de triac sneller stijgt dan de gespecificeerde kritische waarde? De kans is groot dat het onderdeel spontaan ontsteekt, dus in geleiding komt zonder dat u een signaal op de gate aanlegt. De grote tegen-emk die bij het uitschakelen van bijvoorbeeld een relais over de halfgeleider kan ontstaan is zo steil dat de kritische waarde vaak wordt overschreden.
Bovendien is de kritische spanning-steilheid erg afhankelijk van de temperatuur van het onderdeel. Zoals uit de grafiek van de onderstaande figuur volgt, varieert deze waarde over een factor tien als de temperatuur stijgt van 30 °C naar 120 °C. Hoe warmer het onderdeel wordt, hoe lager de $\Delta u/\Delta t$! Bij het ontwerpen van thyristor- en triac-schakelingen moet u hier absoluut rekening mee houden en de tegen-emk zoveel mogelijk dempen.



De kritische spanning-steilheid van een triac.
(© 2024 Jos Verstraten)

Snubber netwerken in de praktijk

Wat is een snubber?
'*Snubber*' is afgeleid van het Midden-Engels dat werd gesproken tot in de vijftiende eeuw. De betekenis van het woord was oorspronkelijk '*schelden*' of '*vloeken*', maar wordt nu in de elektronica gebruikt om de handeling '*kortsluiten*' of '*dempen*' aan te duiden. Een snubber is een eenvoudig netwerkje, samengesteld uit weerstanden, inductie-arme condensatoren en diodes. In zeldzame exemplaren zit er ook een spoeltje in. U moet het overal gebruiken waar gevaar ontstaat voor het ontstaan van tegen-emk's of ringing. De snubber heeft twee functies:

- Het verkleinen van de amplitude van de tegen-emk of de ringing.
- Het verlagen van de steilheid van deze verschijnselen.

De meeste snubbers zijn ingegoten in een kleine kunststof behuizing, waaruit twee of drie draadjes ontspruiten. De onderstaande foto geeft een typisch voorbeeld van het uiterlijk van een snubber. Vaak lijken snubbers qua uiterlijk erg op bepaalde soorten hoogspanningscondensatoren. Daar moet u, bij het repareren van onbekende apparaten, goed rekening mee houden!



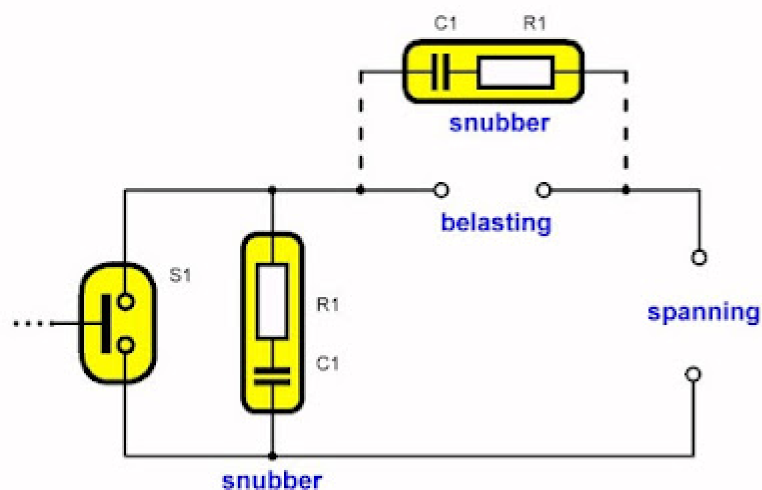
Het typische uiterlijk van een snubber. (© Shelly)

Diverse soorten snubber netwerken
In de loop er jaren zijn diverse combinaties van R, C, D en soms ook L ontwikkeld die allemaal in grote lijnen hetzelfde resultaat hebben. De ene combinatie is echter beter geschikt voor toepassingen bij thyristor- en triac-schakelingen, de andere is beter geschikt voor het toepassen bij geschakelde voedingen.
U kunt de onderstaande combinaties aantreffen:

- De RC-snubber
- De RCD-snubber
- De RCM-snubber
- De LCD-snubber

De RC-snubber

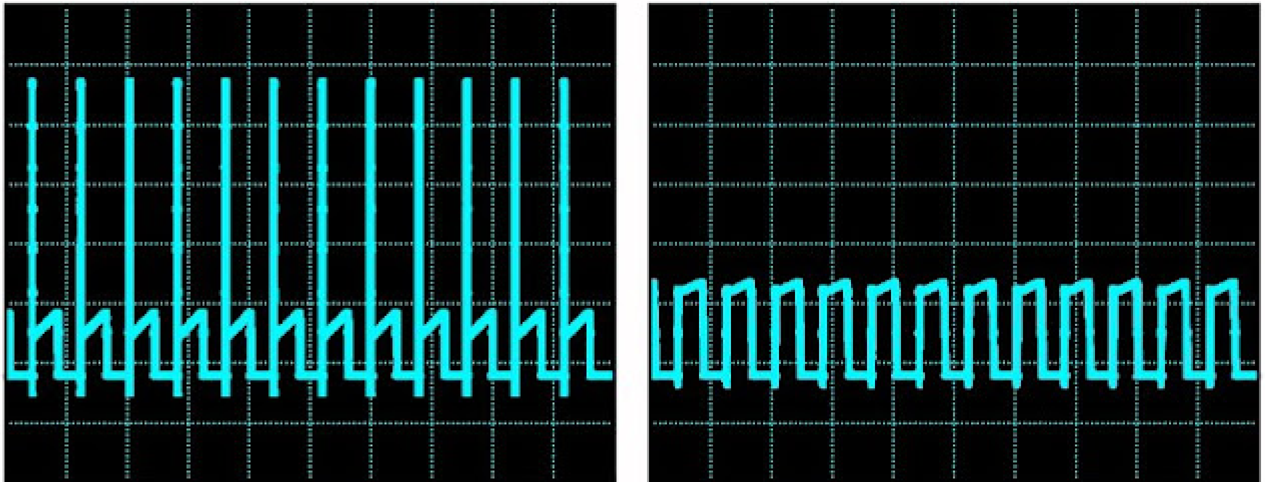
Samenstelling
Deze snubber wordt in de praktijk het vaakst toegepast, vandaar dat wij er het diepst op ingaan. Een RC-snubber bestaat, zie de onderstaande figuur, uit een weerstand en een condensator die in serie over een mechanische of elektronische schakelaar of zijn belasting zijn geschakeld. De twee onderdelen hebben ieder een specifieke functie. De weerstand beperkt de stroom door de condensator en dissipeert een deel van de energie die is opgeslagen in de parasitaire elementen in de schakeling. De condensator absorbeert de spanningspiek en verlaagt de steilheid (Δu/Δt) van de spanning over de schakelaar.
Kiest u voor een lage weerstand, dan wordt er sterk gedempt maar gaat er een forse stroom door de condensator vloeien. Dat zorgt voor opwarming en degeneratie van dit onderdeel.



Het eenvoudige schema van een RC-snubber.
(© 2024 Jos Verstraten)

De plaats van de RC-snubber
In de praktijk kunt u zowel schema's vinden waarbij de RC-snubber over de elektronische schakelaar is geschakeld als schema's waarbij het onderdeel over de belasting is geschakeld. Vandaar dat wij in de bovenstaande tekening de snubber op twee plaatsen in het schema hebben weergegeven.

Het resultaat van een RC-snubber
Dat die twee simpele componentjes veel invloed op een schakeling hebben bewijzen de onderstaande oscillogrammen. Links de spanning over een schakeltransistor zonder RC-snubber, rechts dezelfde spanning maar nu mét een RC-snubber over de transistor.



De U_{ce} van een transistor zonder en mét een RC-snubber. (© 2024 Jos Verstraten)

De waarde van de componenten
Voor het berekenen van de exacte waarden van de snubber-componenten zijn ingewikkelde formules verzonnen die voor de elektronica-hobbyist volstrekt onbruikbaar zijn. U moet bijvoorbeeld de frequentie van de ringing meten en/of de stijgtijd van de tegen-emk puls en daar hebt u in ieder geval een breedbandige oscilloscoop voor nodig (200 MHz!) met een tijdbasis die instelbaar is tot 5 ns/div. Bovendien hangt de waarde van de componenten ook af van de spanning en van het verbruikte vermogen.
U kunt beter gebruik maken van de uit de praktijk afgeleide gegevens die wij in de onderstaande tabel hebben samengevat. Hierin zijn de waarden van R en C gegeven voor een aantal spanningen die in normaal bedrijf over de elektronische schakelaar komen te staan. De tabel gaat uit van een belasting van de elektronische schakelaar van ongeveer 1.000 W, een ringing frequentie van 200 MHz en een stijgtijd van 100 ns.
Als u veel minder vermogen moet schakelen kunt u de waarde van de weerstand met een factor tien verhogen. Denk er wel aan dat u voor de condensator een inductie-arm exemplaar moet toepassen.
Uiteraard geeft deze tabel waarden die niet gelijk zijn aan de meest ideale waarden voor een bepaalde schakeling met een bepaalde belasting. De tegen-emk en de ringing worden dus niet maximaal onderdrukt, maar in ieder geval wel voldoende om geen storingen te kunnen veroorzaken.

SPANNING OVER SCHAKELAAR	WAARDE WEERSTAND	VERMOGEN WEERSTAND	WAARDE CONDENSATOR	SPANNING CONDENSATOR
30 V	3,3 Ω	0,5 W	100 nF	70 V
45 V	4,7 Ω	0,5 W	100 nF	90 V
60 V	6,8 Ω	0,5 W	100 nF	120 V
125 V	15 Ω	0,5 W	100 nF	190 V
230 V	27 Ω	1,0 W	100 nF	330 V
300 V	27 Ω	5,0 W	330 nF	600 V

Uit de praktijk afgeleide waarden voor de snubber-onderdelen. (© 2024 Jos Verstraten)

Inductie-arme condensatoren
Volgens '*chat-GPT*' zijn de onderstaande condensatoren inductie-arm:

- Filmcondensatoren:
  Deze hebben typisch een platte, gestapelde structuur die inductieve effecten vermindert.
- Mica-condensatoren:
  Gebruiken mica als diëlektricum en hebben een lage inductie vanwege hun compacte en gestructureerde ontwerp.
- Keramische condensatoren:
  Multilayer keramische condensatoren (MLCC's) hebben gestructureerde interne lagen, die de inductie minimaliseren.
- Interdigitale condensatoren:
  Vanwege hun ontwerp met overlappende elektroden wordt de inductie geminimaliseerd.
- Foliediëlectricum condensatoren:
  Dit zijn speciale typen condensatoren waarbij de elektroden zijn aangebracht op een dunne folie, wat resulteert in lage inductie vanwege de symmetrische opstelling.

Toepassingen van RC-snubbers
Tegenwoordig worden er heel wat 230 V belastingen in huis elektronisch geschakeld. U hebt daar bijvoorbeeld mee te maken als u domotica toepast. Alle ontvangers van zo'n domotica-systeem bevatten relais of elektronische schakelaars die in de meeste gevallen LED-lampen en motoren (zonneweringen, garagepoorten, ventilatoren) in- en uitschakelen. Zowel LED-lampen als motoren zijn inductieve belastingen die bij het uitschakelen tegen-emk's en ringingen kunnen veroorzaken. Algemeen wordt aanbevolen dergelijke belastingen te voorzien van een RC-snubber. U kunt die uiteraard zélf maken, maar die zijn ook kant-en-klaar te koop. Bij vrijwel alle elektronica onderdelen leveranciers kunt u terecht voor dergelijke kant-en-klare RC-snubbers.

De GL4260 van GreenLED voor LED-lampen
In de onderstaande foto ziet u bijvoorbeeld de GL4260 van GreenLED, die door Reichelt wordt geleverd voor ongeveer € 4,00 per stuk. Deze snubber bevat een condensator van 100 nF en een weerstand van 100 Ω. Deze snubber is speciaal ontwikkeld voor het onderdrukken van ringing en tegen-emk die ontstaan als u elektronisch gevoede LED-verlichtingen uitschakelt. U moet het onderdeel parallel schakelen aan de LED-lamp. Dank zij de twee soepele aansluitdraadjes kunt u de GL4260 monteren in het LED-armatuur en aansluiten op het kroonsteentje dat vrijwel steeds in zo'n armatuur aanwezig is.



De RC-snubber GL4260 van GreenLED. (© GreenLED)

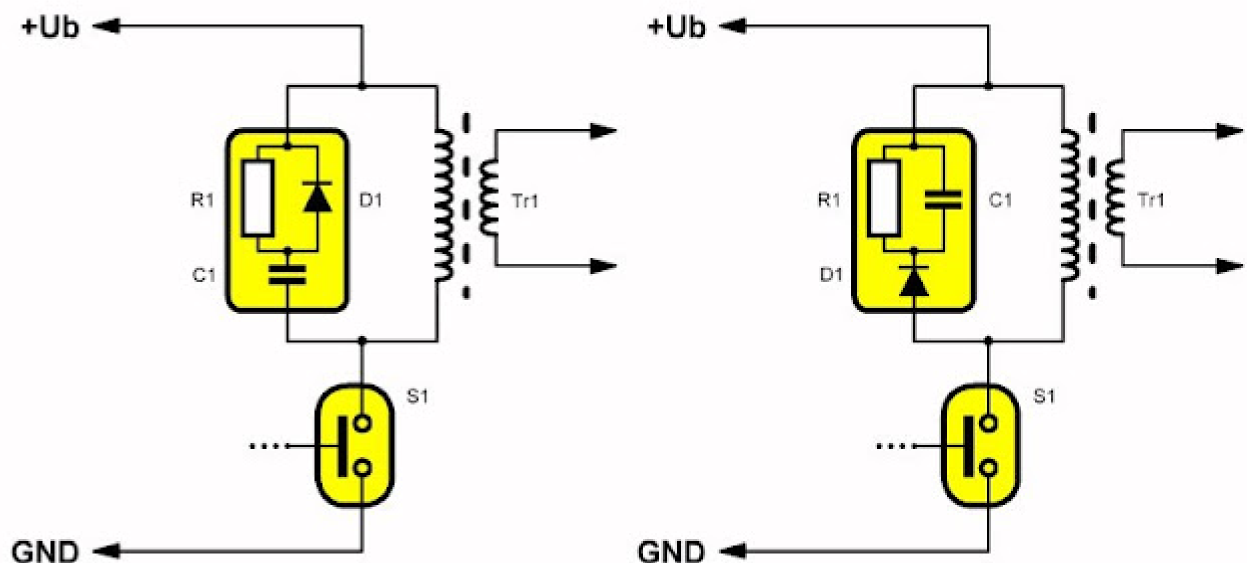
De MCP-P van Shelly
Een vergelijkbare RC-snubber is de MCP-P van Shelly. Deze is met zijn prijs van € 2,95 goedkoper dan de GL4260 van GreenLED, maar zit niet in het programma bij de bekende Nederlandse leveranciers.



De RC-snubber MCP-P van Shelly. (© Shelly)

De RCD-snubber

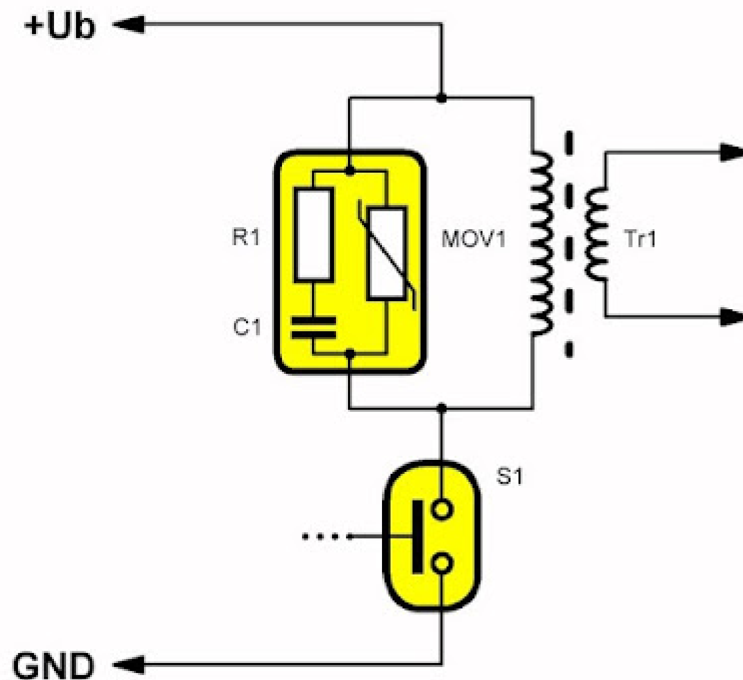
Samenstelling
De RCD-snubber bestaat uit een RC-snubber waaraan een extra diode wordt toegevoegd. Daarbij worden twee systemen toegepast. Bij het eerste systeem staat de diode parallel aan de weerstand geschakeld. De diode overbrugt de weerstand tijdens het uitschakelen van de inductieve belasting, waardoor de condensator snel kan opladen en de inschakelverliezen worden beperkt. De diode blokkeert ook de inverse stroom tijdens het inschakelen van de belasting, waardoor de stroom door de weerstand loopt en de condensator ontlaadt. De weerstand absorbeert dan de energie die is opgeslagen in de parasitaire elementen en beperkt de verliezen.
Bij het tweede systeem staan de weerstand en de condensator niet in serie, maar parallel. De diode staat dan in serie met deze combinatie. Deze snubber wordt ook wel de '*flyback snubber*' genoemd, omdat deze voornamelijk wordt toegepast bij flyback transformatoren in geschakelde voedingen.



De twee samenstellingen van een RCD-snubber. (© 2024 Jos Verstraten)

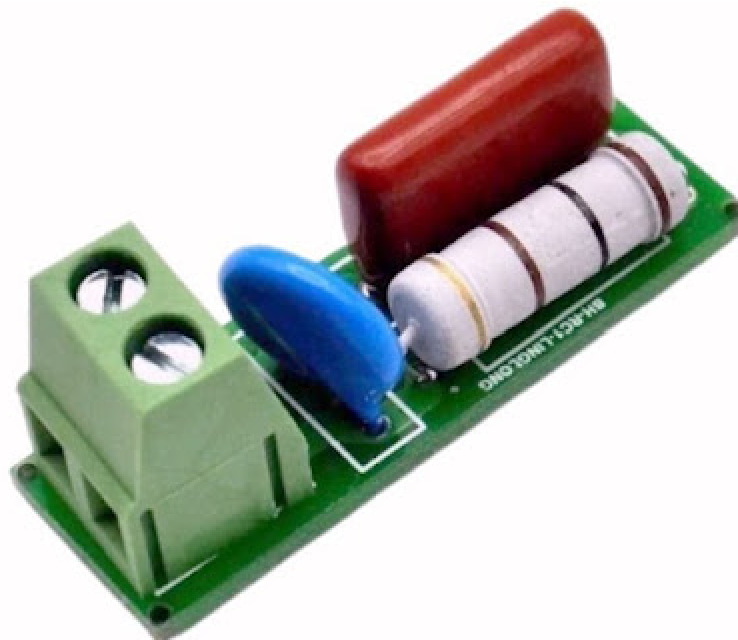
De RCM-snubber

Samenstelling
De M in dit type staat voor '*MOV*', ofwel '***M****etaal* ***O****xyde* ***V****aristor*'. Parallel over de RC-combinatie staat nu een MOV geschakeld. Dit onderdeel is zeer effectief in het onderdrukken van grote korte spanningspieken die over de inductieve belasting kunnen ontstaan.



De samenstellingen van een RCM-snubber.
(© 2024 Jos Verstraten)

Spotgoedkoop in China
Via AliExpress kunt u voor de bespottelijke stukprijs van € 0,67 een printje met daarop de drie onderdelen van een RCM-snubber kopen. Er zit ook nog een printkroonsteentje op, zodat u het printje gemakkelijk met een belasting kunt verbinden.

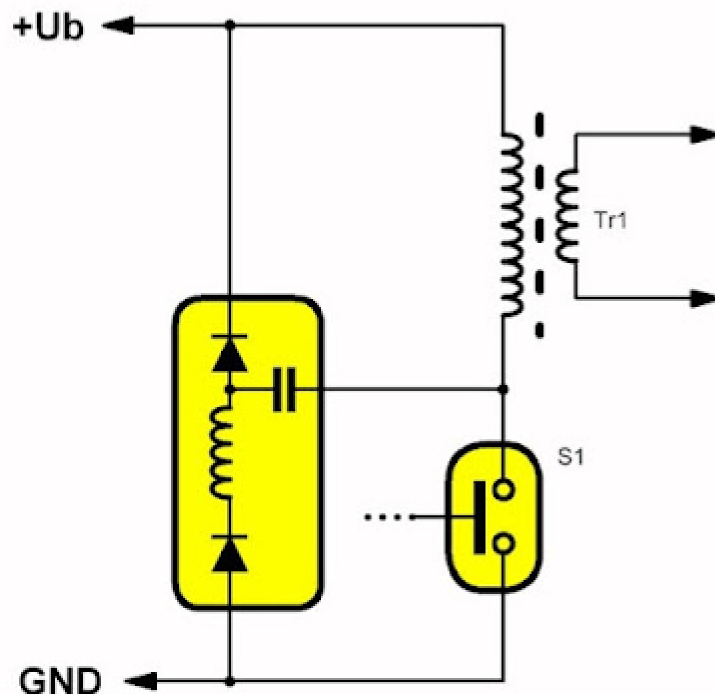


Een kant-en-klare RCM-snubber. (© AliExpress)

De LCD-snubber

Samenstelling
Een LCD-snubber is een driepotige resonante schakeling die gebruik maakt van een spoel en een condensator die parallel staan aan de elektronische schakelaar en zijn belasting. De spoel en de condensator vormen een resonantiekring die energie uitwisselt met de parasitaire

elementen in uw schakeling tijdens de schakelovergangen. Omdat er geen weerstand aanwezig is die energie opslorpt treedt er ook geen verlies op, vandaar dat deze snubber ook wel eens de benaming '*lossless snubber*' krijgt. Naast de C en de L zijn er ook twee diodes aanwezig volgens het onderstaande schema.



De samenstelling van een LCD-snubber. (© 2024 Jos Verstraten)

Eigenschappen
Een LCD-snubber is zeer efficiënt en geschikt voor hoogfrequente toepassingen, maar is nogal een uitdaging voor de ontwerper. De resonantie-eigenschappen van de LC-kring moeten precies aansluiten bij de resonantie-eigenschappen van de parasitaire elementen in de schakeling. Alleen dan zal de energie efficiënt van de ene kring naar de andere worden overgedragen.